



# UNA DÉCADA DE TELEDETECCIÓN EN EL GRUPO DE INGENIERÍA ELECTROMAGNÉTICA Y FOTÓNICA

*Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones,  
Universitat Politècnica de Catalunya*

## 0. INTRODUCCIÓN

El Grupo de Ingeniería Electromagnética y Fotónica (EEF) pertenece al Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universitat Politècnica de Catalunya. Dicho grupo está formado por 35 profesores, unos 15 estudiantes de doctorado, y unos 60 estudiantes que realizan su proyecto final de carrera. Las líneas de investigación se centran en el diseño y análisis de antenas, circuitos de microondas, teledetección (activa o radar, pasiva o radiometría, y óptica) y comunicaciones ópticas. El grupo EEF dispone de las siguientes instalaciones:

- un laboratorio de radiofrecuencia, completamente equipado hasta 75 GHz,
- una cámara anecoica de 10 m x 7.5 m x 7.5 m para la medida de antenas en campo próximo hasta 40 GHz,
- una cámara anecoica media con un campo compacto para la medida de sección recta radar,
- un laboratorio de óptica integrada,
- una laboratorio de software con una plataforma UNIX compuesta por un servidor multiprocesador RISC, 15 estaciones de trabajo UNIX/LINUX y varios terminales X; y una plataforma MS-Windows con tres servidores Windows 2000 y más de 100 clientes Windows. El backbone de comunicaciones está basado en una red Gigabit Ethernet, con acceso al backbone del Campus por medio de enlaces ATM redundantes.
- Además se dispone de acceso a las capacidades de supercomputación del propio campus (CESCA y CEPBA).

Las actividades de investigación del grupo EEF se llevan a cabo en cooperación con la industria e instituciones nacionales y europeas, de las que se obtiene la financiación. Las actividades de teledetección del grupo EEF se pueden dividir en tres grandes líneas: pasiva en microondas (radiometría y utilizando señales de oportunidad GPS reflejadas), activa en microondas (radar de apertura real y sintética) y óptica, cada una de las cuales cubre tanto desarrollos teóricos como experimentales [1]. A continuación, un miembro de cada una de estas líneas de investigación, describe brevemente las principales actividades en los últimos 10 años.

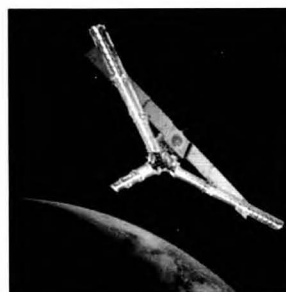
## 1. TELEDETECCIÓN PASIVA EN MICROONDAS

*por A. Camps y Mercé Vall-llossera*

En 1993 se inicia una serie de proyectos financiados tanto por la Agencia Europea del Espacio (ESA), como por la industria nacional y europea y proyectos de investigación de la CICYT en el campo de la teledetección pasiva en microondas, y más concretamente, en radiometría de microondas, o medida de la potencia de ruido térmico captada por una antena a una frecuencia y polarización determinadas.

### 1.1. Radiometría por síntesis de apertura

La investigación dedicada a la radiometría por síntesis de apertura ha venido principalmente asociada a la Misión Earth Explorer de la ESA llamada SMOS/MIRAS (Soil Moisture and Ocean Salinity/Microwave Imaging Radiometer by Aperture Síntesis, Figura 1a) [2]. En esta misión se aplican por primera vez estas técnicas, heredadas de la radioastronomía (Figura 1b) [3], a la observación de la Tierra. El objetivo es conseguir una resolución angular relativamente alta a partir de una agrupación de antenas de pequeñas dimensiones. Asimismo, esta misión será la primera dedicada a la medida desde el espacio de la humedad del terreno y la salinidad del mar. La medida de estos parámetros a escala global ayudarán a comprender mejor el cambio climático, la desertización y fenómenos meteorológicos como el Niño y la Niña.



*Figura 1a. Visión artística del instrumento MIRAS para la misión SMOS de la ESA. Nótese el parecido con el VLA (véase Figura 1b).*



*Figura 1b. El Very Large Array (VLA) en Socorro, Nuevo Méjico, USA.*

La participación del grupo de la UPC en este proyecto ha abarcado el análisis de las prestaciones del instrumento en términos de resolución angular y radiométrica [4,5], y el compromiso que existe entre ambas, el análisis de las diferentes fuentes de error (receptores, antenas, correladores etc.) [6,7,8] y la propuesta de nuevos métodos de calibración [9] y de reconstrucción de imágenes [10] a partir de los

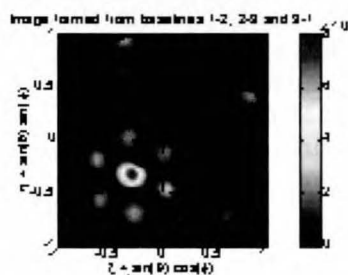


**Figura 2a.** Prototipo en banda X formado por 2 antenas móviles que se desplazan a lo largo de unos brazos en forma de Y.

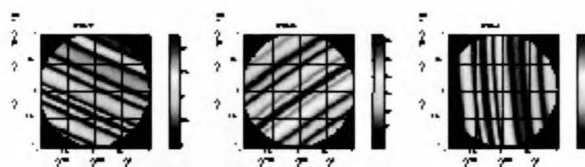


**Figura 2b.** Composición de 4 imágenes sintéticas de temperatura de brillo. Los absorbentes de microondas aparecen a temperatura ambiente. Las placas metálicas reflejan la radiación del cielo y aparecen fríos.

observables, así como el análisis de fallos e interferencias etc. Las prestaciones de un instrumento tan complejo como éste, unido al hecho de que sea el primero de su serie, ha requerido la implementación de un simulador “end-to-end” [11], desarrollado por la UPC en colaboración con las empresas EADS-CASA y GMV [12]. Asimismo, para validar este nuevo diseño de radiómetro se construyó un demostrador de laboratorio del mismo en banda X (Figura 2a) [13], con el que se estudiaron algunos de los problemas reales que aparecen en este nuevo tipo de instrumentos. Dicho demostrador estaba formado por dos antenas que se desplazaban a lo largo de los tres brazos en forma de Y, como se muestra en la Figura 2a. La Figura 2b muestra 4 imágenes sintetizadas con dicho radiómetro a partir de las medidas de la temperatura de brillo de las placas metálicas situadas sobre el absorbente que se muestran debajo de dichas imágenes.



**Figura 3b.** Imagen “sintética” del Sol formada a partir de las correlaciones mostradas en la Figura 3a.

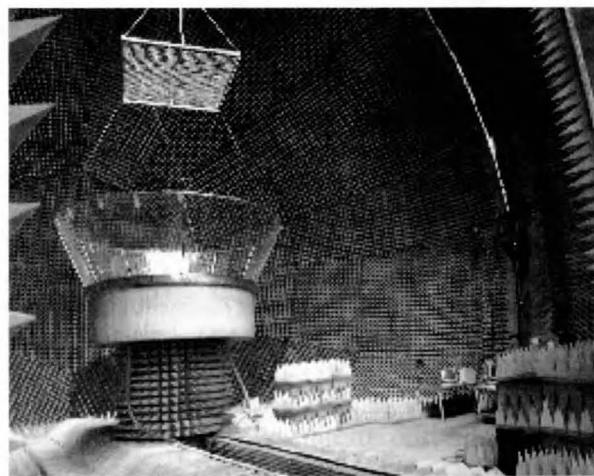


**Figura 3a.** Pares de correlaciones obtenidos entre las antenas 1 y 2, 2 y 3, y 3 y 1 (L'Albi, 18/12/2002).

Además, también en el campo de la radiometría por síntesis de apertura, en este último año, se están estudiando nuevas configuraciones de radiómetros que permitan formar imágenes a partir de las correlaciones de las señales recibidas por sólo tres antenas, pero introduciendo distintos retardos. La Figura 3 muestra un ejemplo del proceso de formación (sin compensación de fase) de una imagen del Sol a partir de cada uno de los tres pares de correlaciones, con un sistema en banda L (1.413 MHz) con 8 MHz de ancho de banda y una separación entre antenas de 170 m [14].

## 1.2. Radiometría interferométrica

La radiometría interferométrica utilizando una única línea de base se ha estudiado en teledetección de hidrometeoros (lluvia, hielo...). Esta técnica aprovecha las diferentes propiedades que éstos presentan frente al fondo (superficie de la tierra o mar, mucho más uniforme). La Figura 4 muestra uno de los experimentos llevados a cabo en el European Microwave Signature Laboratory, Joint Research Center/Space Applications Institute (Ispira, Italy), donde un generador de lluvia artificial en el interior de una cámara anecoica se dispuso frente de un radiómetro interferométrico. El generador fue diseñado con 2000 poros y podía generar intensidades de hasta 1500 mm/h desde una altura de 3 m. El radiómetro interferométrico esta formado por dos antenas en el que se varía la separación entre ellas [15].



**Figura 4.** A la izquierda, generador de lluvia (JRC) para generar intensidades de lluvia de hasta 1500 mm/h desde 3 m de altura. A la derecha, radiómetro interferométrico en banda X (UPC).

## 1.3. Radiometría Polarimétrica

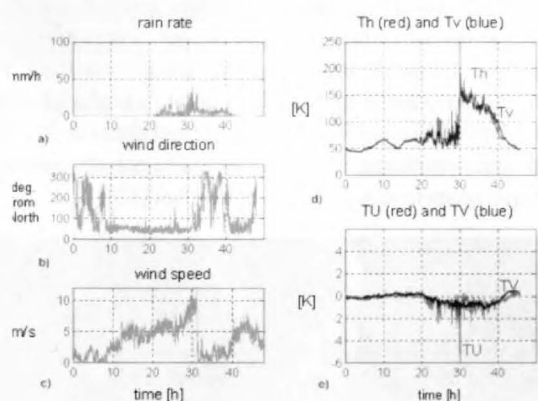
La radiometría polarimétrica mide, además de la potencia de ruido captada por la antena en polarizaciones vertical y horizontal, la correlación cruzada compleja de los campos eléctricos recibidos en ambas polarizaciones.

Numerosos estudios teóricos y experimentales han demostrado en la última década que la aplicación de estas técnicas permite determinar la dirección y la velocidad del viento sobre la superficie del mar, con prestaciones simi-

lares a los dispersómetros de viento radar. Sin ir más lejos, este mismo año ha sido lanzada al espacio la misión Coriolis/Windsat, que es la primera en incorporar radiómetros polarimétricos con este fin.



**Figura 5a.** Radiómetro polarimétrico en banda X (Laboratorio del Módulo D3, UPC-Campus Nord, Barcelona).



**Figura 5b.** La suma de las temperaturas de brillo en polarización vertical y horizontal sigue aproximadamente la intensidad de lluvia. La diferencia indica la asimetría de las gotas de lluvia (mayor a mayor intensidad). El tercer parámetro (U) depende de la orientación producida por el viento y el cuarto (V) por la depolarización producida fundamentalmente por los cristales de hielo.

Sin embargo, todavía se conoce poco sobre la emisión polarimétrica del suelo cubierto por vegetación, de los hidrometeoros, etc. Para avanzar en estos campos, en la UPC se han llevado a cabo algunos estudios teóricos que incluyen el modelado discreto del suelo y la vegetación [16], de las gotas de lluvia y de los cristales de nieve y hielo, en función de su tamaño y forma. La Figura 5a muestra el radiómetro polarimétrico en banda X montado en la UPC, situado frente a la ventana del laboratorio para medir la temperatura de brillo en distintas condiciones de lluvia. Las temperaturas de brillo en polarizaciones vertical y horizontal se miden con un radiómetro de Dicke, y el tercer y cuarto parámetros de Stokes

$$U = 2\text{Re}(\langle E_v E_h^* \rangle), \quad V = 2\text{Im}(\langle E_v E_h^* \rangle)$$

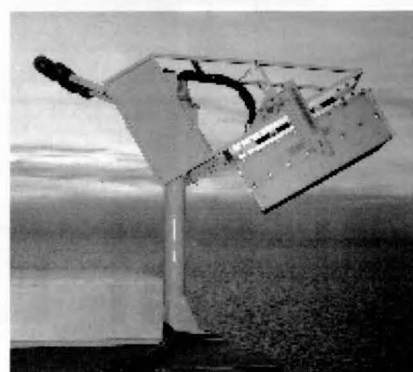
se miden con un correlador digital complejo. La Figura 5b muestra 48 h de medidas durante los días 2 y 3 de Diciem-

bre de 1998, que muestran la dependencia de los 4 parámetros de Stokes (gráficas de la derecha en Figura 5b) comparadas con la intensidad de lluvia, y también la velocidad y dirección del viento (gráficas izquierda en Figura 5b), medidos por las estaciones meteorológicas de Barcelona situadas dentro del haz de la antena del radiómetro [17].



**Figura 6a.** Cara Norte de la Plataforma Casablanca donde se instaló el radiómetro en banda L LAURA durante las campañas WISE 2000 y 2001.

Por otra parte, en el marco de la misión SMOS, se han llevado a cabo las campañas de medida WISE 2000 y 2001, destinadas a la mejora de los modelos de emisión del mar en banda L [18] y, de esta forma, poder desarrollar algoritmos de recuperación de salinidad precisos a partir de medidas radiométricas [19]. Estas campañas se llevaron a cabo en la plataforma petrolífera Casablanca de Repsol, en las costas de Tarragona (Figura 6) en otoño del 2000 y del 2001, y fueron fruto de la cooperación internacional con el Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, las Universidades de Valencia y Massachusetts (USA), y el Laboratoire d'Océanographie Dynamique et Climatologie y el Centre d'Études Terrestres et Planétaires (Francia).



**Figura 6b.** Radiómetro LAURA en la plataforma Casablanca.

Próximamente, también en el marco de la misión SMOS, se llevarán a cabo nuevas campañas de medida. Una de ellas será específica para la caracterización de la espuma del mar y se realizará en Poble Nou del Delta (Tarragona). En la recuperación de salinidad es necesario determinar la emisividad de las zonas de mar cubiertas por espuma en banda L. Además, dentro del marco de la misión SMOS, es importante realizar campañas de medidas que estudien la emisividad del suelo descubierto y cubierto por vegetación. Está prevista una campaña de medidas en unos campos con humedades controladas en Requena (Valencia) para el próximo verano.

#### 1.4. Altimetría y monitorización del estado del mar utilizando señales de oportunidad GPS

La altimetría y estado del mar utilizando señales de oportunidad GPS es la línea de investigación abierta más recientemente, en el 2001, como fruto de la colaboración con el Institut d'Estudis Espacial de Catalunya, para quien se construyó el receptor GPS de 3 cadenas DODEREC (DOppler DELay REceiver) mostrado en la Figura 7a [20]. Este sistema permite captar hasta tres señales GPS procedentes de antenas diferentes, demodularlas en fase y cuadratura, muestrearlas a 20 MHz y almacenarlas en un disco duro de 80 Gbytes de manera sostenida.



Figura 7a. DOppler DELay REceiver desarrollado para el IEEC.

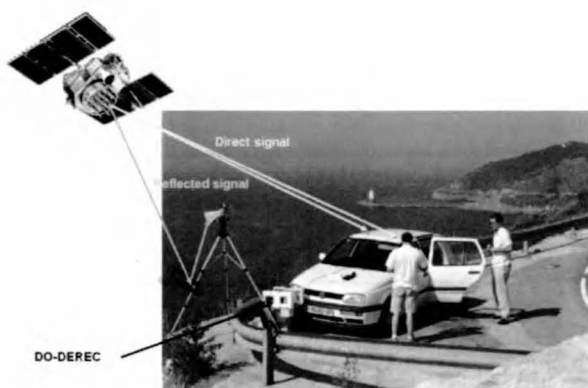


Figura 7b. Test del DODEREC en las costas del Garraf.

Este receptor permite captar la señal directa y reflejada procedente de un mismo satélite (Figura 7b), y constituye un altímetro si se conoce la geometría de observación. Si además, se estudian las propiedades de la señal reflejada, es posible obtener información sobre el estado del mar: el fenómeno es similar al de la reflexión del Sol sobre el mar: la reflexión es distinta para un mar en calma que cuando está perturbado por el viento (Figura 8).



Figura 8a. Reflexión del Sol en el mar en calma.



Figura 8b. Reflexión del Sol en el mar con una ligera brisa. Notar que la reflexión ya no es tan especular.

## 2. TELEDETECCIÓN ACTIVA EN MICROONDAS

por J.J. Mallorquí

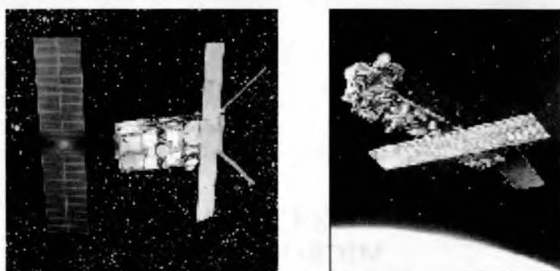
En aplicaciones de observación de la Tierra las ventajas de los radares de apertura sintética (SAR) respecto a los sistemas ópticos se conocen desde los años 70: alta resolución espacial, capacidad de trabajar a cualquier hora del día, independencia de las condiciones atmosféricas y meteorológicas, gran sensibilidad a la morfología de las superficies y objetos observados, etc. Las actividades en este campo se iniciaron en 1992 con el procesamiento interferométrico de los primeros datos del satélite ERS en el marco de un proyecto con la ESA. Desde entonces el grupo ha trabajado en todos los aspectos relacionados con el SAR: construcción de sensores terrestres, procesamiento de datos crudos (*raw data*) de sensores tanto orbitales, aerotransportados y terrestres, interferometría e interferometría diferencial para aplicaciones cartográficas y de control de riesgos, polarimetría orientada a la clasificación y caracterización de cultivos, detección de barcos y contaminantes en el mar, simuladores de sistemas SAR, etc. El grupo ha colaborado en el marco de varios proyectos con distintas instituciones y empresas, entre las que hay que destacar: ESA, DLR, Indra Espacio, INTA, Institut Cartogràfic de Catalunya, IREA-CNR, Joint Research Center (JRC-Ispira) y Thales Airborne Systems.

### 2.1. Procesado SAR

Un SAR es básicamente un radar coherente montado en una plataforma móvil que se va desplazando a medida que manda los pulsos. Dado que el haz de la antena ilumina una zona grande de la superficie terrestre, conocida como *swath*, todas las contribuciones situadas a la misma distancia del sensor llegan simultáneamente, de manera que los datos crudos forman una imagen totalmente desenfocada.



Los ecos medidos por el radar coherente que se desplaza sobre la escena contienen la información holográfica de su distribución espacial de reflectividad radar. La formación de una apertura o agrupación sintética de antenas mediante el procesado SAR de los ecos registrados permite obtener imágenes de reflectividad de la escena con resoluciones espaciales que pueden llegar a ser inferiores al metro dependiendo del ancho de banda del pulso y de las características de la antena radar. Esta reflectividad posee un valor complejo que contiene la fase del camino eléctrico recorrido por la onda en su viaje emisor-superficie-receptor, información básica para las aplicaciones de interferometría que se presentarán a continuación.



**Figura 9a.** Satélites ERS1 (izquierda) y ENVISAT (derecha) de la ESA.

El grupo tiene experiencia en el desarrollo de procesadores para distintas plataformas tanto orbitales, como el caso de ERS, como aerotransportadas, sistema E-SAR del DLR (Figura 9). Aunque los algoritmos de procesado para datos orbitales y aerotransportados son muy parecidos, en el segundo caso la complejidad es mayor al tener que incluirse técnicas de compensación de movimiento que permitan corregir la trayectoria inestable de la plataforma [21]. Existen versiones del procesador para PC, estación de trabajo e incluso para el ordenador paralelo SGI O2000 del CEPBA [22], versión realizada en el marco del proyecto europeo PARSAR en colaboración con la empresa INDRA Espacio.

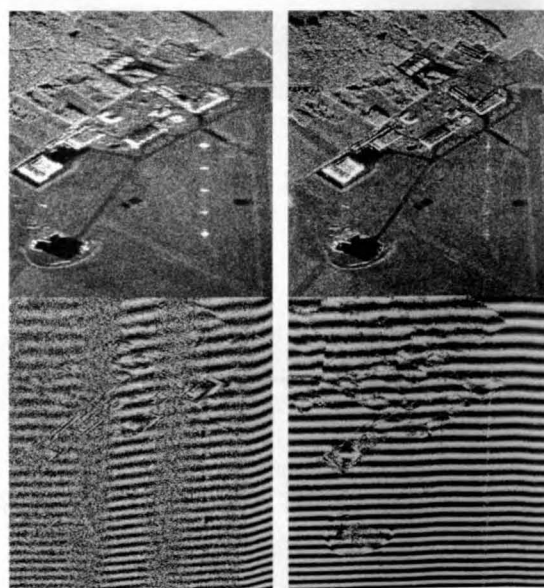


**Figura 9b.** SAR aerotransportado E-SAR del Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Se han desarrollado algoritmos para los distintos modos de funcionamiento de los sensores: *stripmap*, en el que la antena apunta de forma fija y ortogonal a la trayectoria de la plataforma, y *spotlight*, en el que la antena apunta siempre a la misma escena durante el movimiento de la plataforma. Actualmente estamos trabajando en la ampliación del procesador para trabajar con datos del satélite RADARSAT en modo *scansar*, en este modo el haz de la antena se va desplazando cada cierto tiempo entre *subswaths* vecinos para aumentar el área total explorada. También está previsto el procesado de datos del nuevo sensor ENVISAT de la ESA. La Figura 10 muestra un ejemplo de imagen



**Figura 10.** Imagen SAR del área de Barcelona del satélite ERS2 de la ESA.

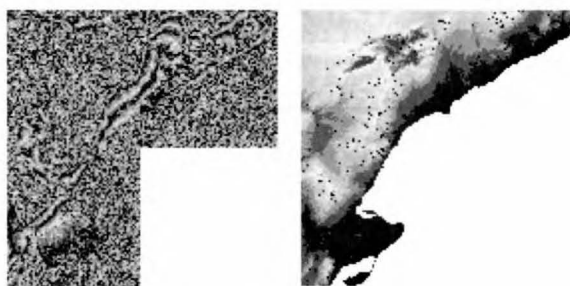


**Figura 11.** Imagen e interferograma con datos del E-SAR (DLR) procesados sin compensación de movimiento (izquierda) y con compensación de movimiento (derecha).

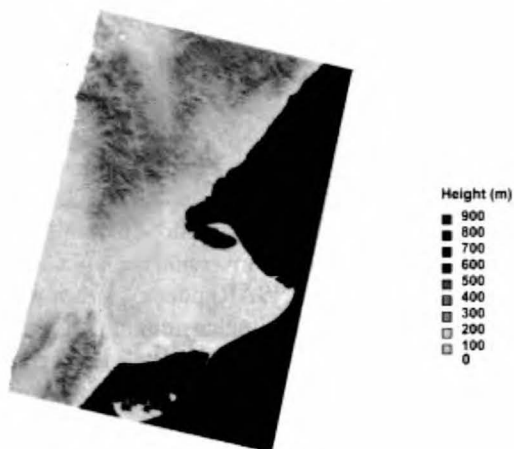
del satélite ERS y la Figura 11 la importancia de la compensación de movimiento en el caso aerotransportado.

## 2.2. Interferometría e interferometría diferencial

En interferometría SAR se trabaja con pares de imágenes obtenidas desde posiciones separadas por una distancia, o línea de base, adecuada. Mediante un alineado y corrección compleja se obtiene la diferencia de fase para cada punto de la imagen que está relacionado con la elevación del terreno, permitiendo la generación de modelos digitales de elevación (DEM) con precisión submétrica. La cadena interferométrica desarrollada en el grupo permite trabajar tanto con sensores orbitales como aerotransportados. Partiendo de un par de imágenes procesadas, se procede a su corregrado para formar el interferograma. La información útil se encuentra en la fase, pero para poder extraer topografía es necesario desenrollarla (Figura 11a). Una vez la fase está desenrollada se pueden geolocalizar todos los puntos y, finalmente, elaborar el mapa topográfico (Figura 11b). En el caso aerotransportado, además, se han desarrollado algoritmos de calibración y corrección de errores en las imágenes interferométricas [23, 24, 25]. Se han realizado convenios de transferencia tecnológica con Indra Espacio, la cadena interferométrica, y el DLR, algoritmos de georeferenciación precisa.



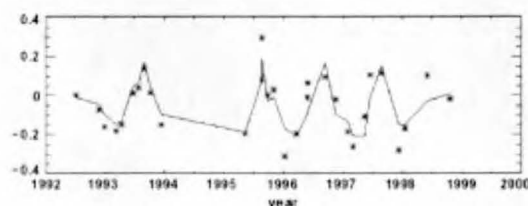
**Figura 12a.** Interferograma obtenido a partir de dos imágenes tandem de los satélites ERS1 y ERS2 de la ESA. A la izquierda en interferograma enrollado y a la derecha desenrollado.



**Figura 12b.** Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona del Delta de Ebro en coordenadas UTM.

Si se trabaja con imágenes interferométricas en modo diferencial, pueden medirse alteraciones en altura de las superficies con precisiones del orden de los milímetros, permitiendo la monitorización de cambios de terrenos con indudables aplicaciones en estudios de erosión, dinámica costera, explotación petrolífera, geodinámica, sismología y vulcanología. La interferometría diferencial clásica se limitaba a utilizar un par de imágenes de línea de base corta, para minimizar el efecto de la topografía, a la que se eliminaba la componente topográfica de la fase mediante la utilización de un DEM de la zona. En la práctica las limitaciones son múltiples debido a la decorrelación temporal o pérdida de coherencia de fase de las imágenes, los artefactos atmosféricos presentes en las imágenes y los errores residuales del DEM utilizado. Para solventar estas limitaciones se han desarrollado algoritmos avanzados que se basan en la utilización de un gran número de imágenes adquiridas a lo largo del período de observación, generalmente varios años. Mediante el ajuste de un modelo a los datos se pueden determinar las componentes de movimiento para cada píxel de la imagen tanto lineal como no lineal, el error en el DEM utilizado para eliminar la componente topográfica y recuperar la atmósfera para cada imagen, eliminando así su contribución [26, 27, 28]. Se han realizado convenios con Indra Espacio y colaboraciones con el Institut Cartogràfic de Catalunya y el IREA italiano. Actualmente colaboramos con el DLR en la extensión de estas técnicas al caso aerotransportado.

La Figura 13 muestra la capacidad del sistema para medir pequeñas deformaciones en edificios, en este caso una nave industrial metálica de la ciudad de Nápoles. El patrón de deformación se ajusta perfectamente a las variaciones térmicas registradas.



**Figura 13.** Correlación entre la deformación (cm) en una estructura metálica (\*) y las variaciones térmicas (línea continua,  $+5^{\circ}$ - $35^{\circ}$ ) en la ciudad de Nápoles.

## 2.3. Simulación de sistemas SAR

En el marco del proyecto europeo IMPAST [29] se está desarrollando un simulador de sistemas SAR polarimétricos que permita simular de forma realista el raw data que registraría un sistema SAR orbital al iluminar un barco pesquero. El simulador se basa en el código de predicción de sección recta radar (RCS) mediante algoritmos de alta frecuencia desarrollado en el Departamento llamado GRECO al que se le han añadido módulos para el cálculo de la órbita del satélite, su actitud, modelado de la señal radar, etc. Los modelos de barcos se construyen utilizando programas de CAD a partir de

información de barcos reales proporcionada por los astilleros. El simulador permite conocer las limitaciones de los sistemas actuales para la detección y clasificación de barcos, y estudiar futuras configuraciones para esta aplicación que incluyan polarimetría y distintos modos de funcionamiento [30]. La Figura 15 muestra el diagrama de bloques del simulador y la Figura 16 una pantalla de GRECO con un pesquero.

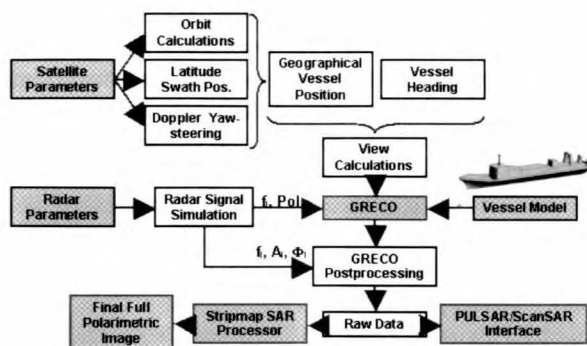


Figura 15. Diagrama de bloques del simulador SAR orbital.

El simulador se está validando a partir de las medidas adquiridas en distintas campañas sobre barcos conocidos y monitorizados. En el marco del mismo proyecto también se están desarrollando algoritmos para la detección de barcos en imágenes SAR.

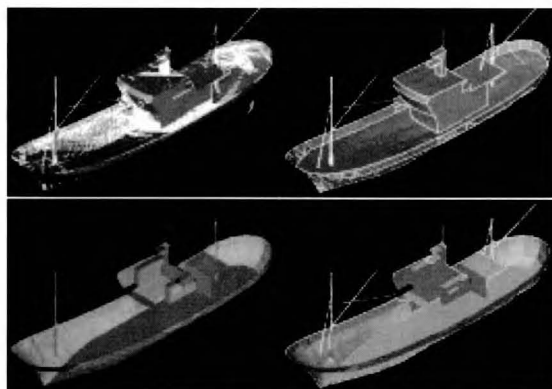


Figura 16. Modelo de barcos pesquero en una pantalla de GRECO. La ventana superior izquierda muestra los impactos de rayos en las superficies visibles del objeto (puntos blancos), la ventana inferior izquierda muestra las caras ocultas. La ventana superior derecha muestra las aristas del objeto y la inferior derecha las aristas que pertenecen a un solo objeto.

## 2.4. Dispersómetro polarimétrico

Las imágenes proporcionadas por radares de apertura sintética (SAR) embarcados en satélites o aerotransportados aportan una importante información sobre diferentes parámetros geofísicos y biológicos de la superficie terrestre. Para la correcta interpretación de estas imágenes, debe de establecerse un nexo de unión entre los mecanismos que producen la dispersión electromagnética del eco radar y los parámetros geofísicos y

biológicos que caracterizan la reflectividad del blanco. Para este fin, existen unos sistemas radar, de baja potencia y corto alcance, denominados dispersómetros, capaces de caracterizar la reflectividad de superficies terrestres y marinas en condiciones controladas.

En el grupo se ha desarrollado un dispersómetro capaz de efectuar medidas en las cuatro combinaciones polarimétricas posibles (HH, VV, HV y VH) y en un margen de frecuencias que cubre de los 2 GHz hasta los 18 GHz (Figura 17). El conocimiento de la reflectividad de un blanco en todas las polarizaciones, en un gran margen frecuencial y en diversos ángulos de incidencia, permite una profunda caracterización de éste. Además, este sistema, mediante unas mínimas modificaciones mecánicas, es capaz de generar imágenes SAR e INSAR de resolución centimétrica [31].



Figura 17. Dispersómetro polarimétrico desplegado en la campaña de medidas en Castellterçol.

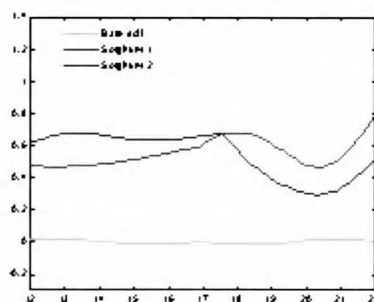


Figura 18. Estimación del valor de altura de vegetación.

En el marco del proyecto Europeo: "Polarimetría Radar: Teoría y Aplicaciones", en colaboración con otros centros europeos como el Centro Aeroespacial Alemán (DLR), el Centro Europeo de Investigación (JRC)-Italia y otros grupos, y utilizando los datos proporcionados por nuestro dispersómetro, se han desarrollado un conjunto de algoritmos polarimétricos de inversión que aplicados sobre imágenes SAR e INSAR pueden proporcionar parámetros geofísicos y biológicos como: rugosidad y humedad del terreno, y biomasa vegetal. La Figura 17 muestra la campaña realizada con el dispersómetro en el pueblo de Castellterçol, donde se midieron dos campos cubiertos de sorgo. Como la máxima respuesta de la cubierta vegetal (sorgo) y el terreno está asociada a polarizaciones diferentes, pueden utilizarse técnicas



polarimétricas-interferométricas con la finalidad de separar los centros de fase de cada blanco y así poder realizar una estima del valor medio de la altura vegetación (Figura 18).

El dispersómetro también se ha aplicado al problema de detección de minas enterradas [32]. En el marco de un nuevo proyecto CICYT se está desarrollando un nuevo sistema radar para monitorización de costas, control de corrimientos de tierras y movimientos estructurales de edificios.

### 3. TELEDETECCIÓN ÓPTICA (LIDAR)

por F. Rocadenbosch

Las actividades del grupo EEF en sistemas lidar atmosféricos se iniciaron en 1993 y han dado lugar al desarrollo de dos grandes sistemas de radar láser pulsado, un sistema lidar elástico 1D (Sec. 3.1) y otro Raman elástico 3D (Secs. 3.2 y 3.3), así como a un considerable know-how en sistemas láser Doppler y subsistemas de baja potencia (Sec. 3.4). Las principales claves tecnológicas y potencialidades asociadas a estos nuevos sistemas de teledetección se describen, a modo de introducción, en el artículo de Rocadenbosch et al., "Remote Sensing mediante LIDAR en la UPC", que aparecerá en el próximo número de esta revista. Su lectura es recomendable de cara a profundizar los resultados aplicados que se describen a continuación y que pretenden ilustrar parte del itinerario de proyectos a través de estos diez años de tecnología lidar en el grupo EEF de la UPC:

#### 3.1 Sistemas lidar elásticos 1D

En 1993 se inicia el desarrollo de la estación lidar elástica (misma longitud de onda incidente que retrodispersada) de exploración atmosférica vertical (de ahí, la denominación de 1D), pionera en España, dentro del proyecto del Plan Nacional de I+D TIC93-043 [33]. El sistema fijo (Figura



**Figura 19.** Estación lidar elástica de exploración vertical (1993-1996). (Izq.) La estación lidar en operación nocturna; (centro) Fuente emisora basada en un láser de Nd:YAG, operando a 532 nm (2 f0) con potencias de pico de » 50MW; (der.) Equipos optoelectrónicos de recepción en el interior de la cúpula en la azotea del módulo D3, Campus Nord, UPC.

19) operaba con pulsos de unos 400 mJ y 10 ns/10Hz de duración a 532 nm (VIS, verde).

Ya con este primer sistema monolongitud de onda, cuyo desarrollo se centró el período 1993-96, se llevaron a cabo diversas campañas de medidas semicuantitativas de los parámetros ópticos atmosféricos de extinción y retrodispersión, coordinadas con el grupo del Instituto de Modelización Ambiental (ITEMA) de la UPC y con el Centro Territorial de Cataluña del Instituto Nacional de Meteorología (INM). Se dispuso así, de una primera base de datos relacional de 237 medidas (1996-97), algunas de las cuáles comprendían el muestreo (aunque irregular) de ciclos diurnos y nocturnos a lo largo de períodos continuados de más de 16 h y, también, de una avanzada librería software de inversión y simulación denominada *link-lidar* (Figura 20).

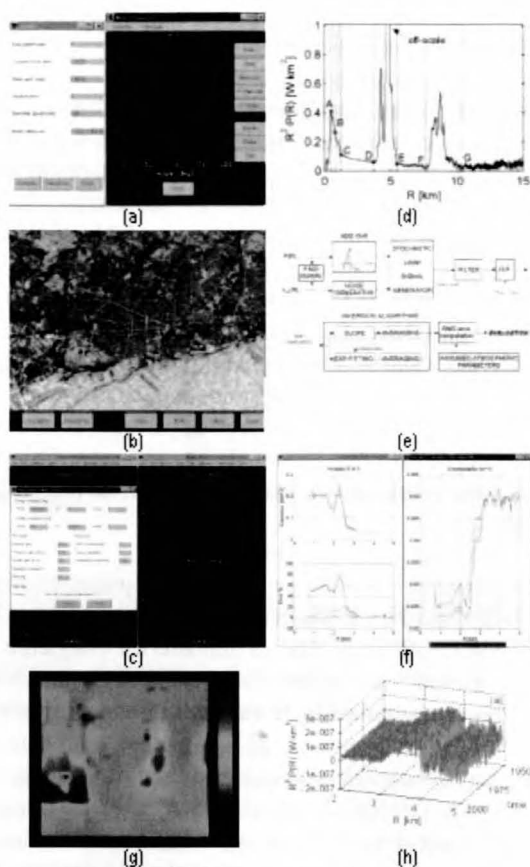
En la actualidad *link-lidar* comprende tres paquetes principales: 1) *link-atmos*, que permite realizar estudios de la dispersión (scattering) elástica atmosférica (Rayleigh y Mie) para mono y poldispersiones, estudios de radiancia solar y lunar y, simulación de trayectos láser sobre el área metropolitana de Barcelona; 2) *link-budget*, orientado al diseño, especificación y simulación extremo a extremo de enlaces lidar; y 3) *link-detect*, el más extenso, que integra múltiples algoritmos de procesado e inversión de señales lidar así como numerosas herramientas de simulación estocástica de dichos algoritmos.

Por lo que respecta al procesado de las señales lidar, desde 1998 el grupo ha contribuido interesantes resultados a la comunidad Óptica y *Lidar Remote Sensing*. Uno de ellos ha sido la evaluación y tipificación de los algoritmos de inversión de los parámetros ópticos atmosféricos conocidos en el estado del arte, en términos de error versus relación señal a ruido y margen de visibilidad atmosférico, así como en términos de las hipótesis calibradoras que manejan [34-36]. Otro de los avances realizados, ha sido la aplicación de la experiencia en técnicas de procesado de la señal en el seno del Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, a la inversión adaptativa de señales lidar, tanto mediante algoritmos basados en aproximaciones sucesivas (algoritmos KFS en *link-detect*) como mediante filtrado de Kalman [37]. De manera continua, *link-lidar* ha ido integrando desde 1993 todas las herramientas de simulación e inversión que se han ido desarrollando hasta nuestros días e incluye, no sólo herramientas ad-hoc orientadas a sistemas elásticos, sino también a sistemas inelásticos de tipo Raman [38], estas últimas desarrolladas en el marco del proyecto europeo EARLINET (2000-2003), que se presentará más adelante.

#### 3.2 Sistemas elásticos 3D

Partiendo de la experiencia adquirida con la estación lidar fija 1D y de la voluntad de explotar las capacidades de medida de estos sistemas en el campo medioambiental (calidad del aire), a finales de 1997 se inicia el desarrollo





**Figura 20.** Presentación de macro-paquete de procesado y simulación lidar, link-lidar.

(a) Análisis polarimétrico de la dispersión Mie (parámetros de Mueller/Stokes) de un aerosol tipo (haze M) dados sus parámetros de tamaño, longitud de onda, densidad de partículas e índice de refracción complejo mediante link-atmos.

(b) Estimación de la trayectoria 3D de un haz láser sobre el área metropolitana de Barcelona mediante link-atmos. Acceso a los parámetros de contaminación del Ayuntamiento de Barcelona.

(c) Simulación paramétrica de alcance lidar (elástico) vs. energía, margen de visibilidad atmosférico y radiancia de fondo para diferentes cabezales detectores (en términos de ganancia, NEP y umbrales de saturación) mediante link-budget

(d) Herramienta de procesado de señales lidar mediante segmentación morfológica en link-detect. Las rayas verticales, que indican intervalos de distancia con características óptico-atmosféricas similares (p. ej. DE y FG identifican nubes), son definidas automáticamente por el algoritmo de procesado de imagen.

(e) Simulador del paquete link-detect para la evaluación estocástica de algoritmos de inversión no adaptativos, en base a sesgo y error cuadrático medio vs. SNR y margen de visibilidad atmosférico.

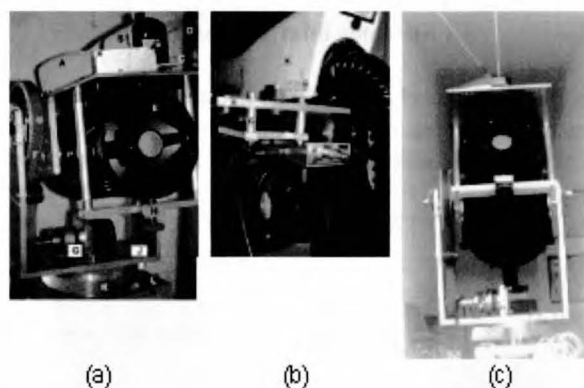
(f) Inversión iterativa de los parámetros de extinción y retrodispersión Mie, mediante el algoritmo KFS (Klett-Fernald-Sasano) de link-detect.

(g) Reconstrucción de una escena de nubes medias (entre 3.2 y 3.7 km de altura) detectadas mediante sondeo lidar elástico utilizando procesado adaptativo de Kalman (paquete link-detect).

(h) Cancelación de ruido en el retorno rango-correctado de una señal lidar ( $R^2P(R)$ ) entre 1950 y 2000 m de altura mediante filtrado de Kalman no-lineal en link-detect.

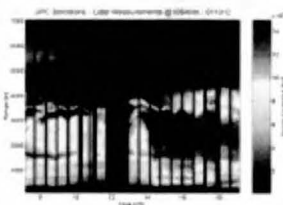
de un lidar elástico portátil con capacidad de apuntamiento 3D (barridos en elevación y acimut [39]). Como criterios ingenieriles básicos se fijan la portabilidad, modularidad y escalabilidad del equipo. El crecimiento continuo de este sistema iba a continuar hasta nuestros días merced a múltiples proyectos nacionales de la CICYT (AMB96-1144-C02, TIC99-1050-C03-01 y REN2000-1754-C02), varios de ellos coordinados, fundamentalmente al nivel de campañas de medidas, con el Instituto de Modelización Ambiental (ITEMA, actualmente Dep. de Ingeniería y Proyectos, UPC), acciones especiales y, de la financiación del V Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Unión Europea (EVR1-CT-1999-40003). Este último proyecto ha permitido consolidarse en la red europea de lidares EARLINET [40] (actualmente formada por más de veinte estaciones), la cual, sobre la base de operación regular y coordinada, tiene como objetivo el establecimiento de bases de datos estadísticas a escala continental que cuantifiquen las emisiones biogénicas y antropogénicas de aerosoles y su impacto climático y ambiental.

Actualmente, el sistema dispone de dos canales elásticos, que le permiten operar a 1064 nm (infrarrojo cercano, NIR) y 532 nm (visible, VIS) con pulsos de unos 120 mJ y 6 ns de duración y una capacidad de barrido 3D de  $300^\circ \times 120^\circ$  (acimut elevación). Además de estas capacidades de medida, se están integrando ópticas polarimétricas y también un tercer canal inelástico en recepción a 607 nm de tipo Raman (V. Sec.3.3 y Figura 21), elementos todos ellos, que lo hacen pionero dentro de red europea EARLINET.

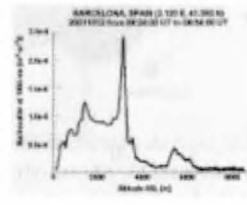


**Figura 21.** Cabezal de emisión/recepción del lidar 3D, 1064/532 nm transportable (actualmente sistema Scanning Raman Lidar, SRL). (Izq.) El láser de Nd:YAG y el doblador de frecuencia (A, B) se encuentran montados sobre una plataforma (C) solidaria al telescopio de 20 cm de apertura (E). Se aprecia el motor de elevación (G) dispuesto transversalmente sobre la base de la horquilla giratoria en azimut (J) y la correa dentada (F), que transmite el movimiento de elevación. (Centro) Vista posterior ilustrando el receptor optoelectrónico acoplado a la rótula porta-objetivos (E); (B, C) corresponden a la mecanización micrométrica de ajuste del factor de solapamiento/apuntamiento óptico. (Der.) El sistema lidar 3D en operación diurna simultánea a 532 nm y 1064 nm (en la foto, tan sólo es visible el haz a 532 nm).

Desde el punto de vista de campañas de medida, la sinergia entre el grupo EEF y el del Ing. de Proyectos tanto en diversos de los proyectos previos comentados del Plan Nacional (AMB96-1144-C02 y REN2000-1754-C02), el proyecto EARLINET de la Unión Europea y, principalmente, en el proyecto IMPACTE de la CIRIT/Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán, ha permitido una alta capacidad de interpretación y análisis de resultados. Ello ha hecho que se esté en una situación especial, que permite avanzar notablemente en el estudio de un ciclo anual que cubra el conjunto de situaciones meteorológicas típicas que se dan, durante un período de tres años (2001-2003), con el feedback que esto supone desde el punto de vista del desarrollo y verificación de nuevas metodologías y modelos meteorológicos [41].

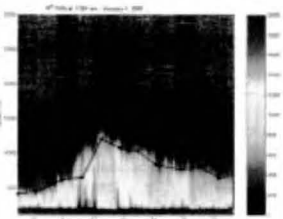


**Figura 22a.** Señal lidar a 1064 nm corregida en distancia ( $R2P(R)$ ), en función de la altura y del tiempo el día 12 de octubre de 2001 (escala de color, unidades arbitrarias).

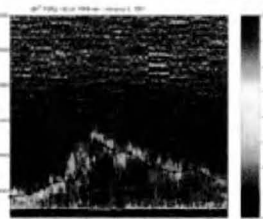


**Figura 22b.** Inversión del coeficiente de retrodispersión ( $m-lsr-1$ ) mediante integración temporal de las medidas de Fig. 4a en el intervalo de media hora entre las 8:24 y las 8:54 UTC.

A título de ejemplo, la Figura 22a muestra la evolución temporal de los retornos lidar rango-corregidos a 1064 nm, con una resolución temporal de 1 minuto, obtenida mediante el lidar 3D de la Figura 21 desde el edificio D3 del Campus Nord de la UPC, el día 12 de octubre de 2001, durante una alerta coordinada medioambiental de invasión de polvo procedente del Sáhara [42]. La imagen es aproximadamente proporcional al coeficiente de retrodispersión de la atmósfera en función de la altura con una resolución espacial de 7.5 m. Se observan claramente



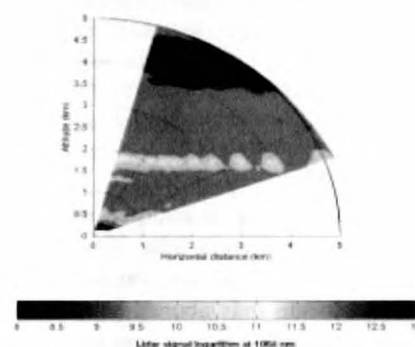
**Figura 23a.** Determinación de la altura de la capa de mezcla a partir de las medidas del 8 de enero de 2001 obtenidas con el lidar 3D de Figura 21a 1064 nm. Señal lidar corregida en distancia ( $R2P(R)$ ), en función de la altura y del tiempo (resolución temporal 1 minuto, escala de color en unidades arbitrarias).



**Figura 23b.** Procesado de la señal lidar mediante derivación y filtrado del retorno corregido en distancia ( $R2P(R)$ ) de Figura 23a, en función de la altura y del tiempo (escala de color, unidades arbitrarias). Puntos superpuestos: altura de la capa de mezcla (PBL).

las estratificaciones de aerosoles hasta unos 4000 m de altura así como un incremento en su espesor y densidad a partir de las 14:00 UTC. La Figura 22b muestra la inversión del coeficiente de retrodispersión a 1064 nm mediante link-detect para la medida de Figura 22a integrada en el intervalo de media hora comprendido entre las 8:24 y las 8:54 UTC.

La Figura 23 muestra la estimación de la evolución temporal de la altura de la capa de mezcla (PBL, una capa formada por aerosoles bien mezclados que se extiende desde el suelo hasta unos 2-3 km de altura y muy influenciada por los ciclos diurnos/nocturnos, vientos y fenómenos de transporte como, por ejemplo, las inyecciones de masas debidas a incendios y a invasiones de polvo en suspensión) a partir de las medidas efectuadas el 8 de Junio de 2001 con el lidar 3D de Fig.21, a 1064 nm. Se combinan algoritmos de inversión de *link-detect* con modelos interpretativos del Dep. de Ing. de Proyectos.



**Figura 24.** Barrido en elevación (RHI) a 1064 nm mediante el sistema lidar 3D de la Fig.3. Alcance 5 km, escala radial a 1km/división, mapa de color en unidades arbitrarias ( $\ln(R2P(R))$  en a.u.)

Finalmente, la Figura 24 es un ejemplo de las posibilidades de información que permite obtener un barrido 2D en elevación (RHI). El barrido entre 30° y 75° de elevación pone de manifiesto la presencia de una estratificación entre 1500 y 2000 m de altura [43].

### 3.3 Lidar Raman

Independientemente de las posibilidades de los lidares elásticos 1D y 3D, este tipo de lidares tan sólo permite invertir información de los coeficientes de retrodispersión y extinción que producen los aerosoles a las longitudes de onda de trabajo con una calidad que depende de hipótesis correladoras no siempre contrastables, como es la relación aproximada entre ambos coeficientes ópticos (lidar ratio) y los valores de calibración que el usuario debe introducir en los algoritmos de inversión [35,44].

A diferencia de lo que ocurre con los sistemas elásticos, en que la longitud de onda en recepción es la misma que en emisión, los sistemas lidar Raman utilizan la radiación dispersada por efecto Raman (inelástica) con los constitu-

yentes atmosféricos, que se produce a una longitud de onda desplazada con respecto de la emitida y que es propia de cada molécula o átomo, para autocalibrar los retornos lidar procedentes de los canales elásticos a 1064 nm y 532 nm.



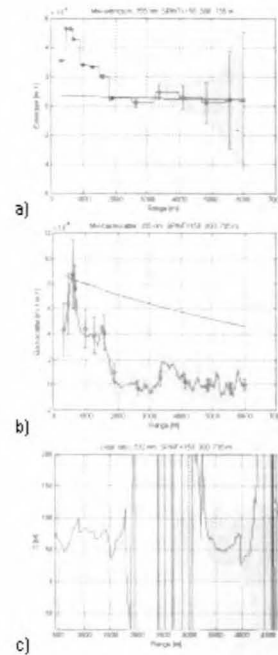
**Figura 25.** Layout óptico del cabezal Raman del sistema lidar 3D (Scanning Raman Lidar, SRL), que permite separar las tres longitudes de onda en recepción (las dos elásticas 1064/532 nm y la inelástica Raman a 607 nm). Se observa la entrada por fibra óptica (A) procedente del telescopio (no visible en la foto), lentes colimadoras (B), filtros dicróicos separadores (C,D), receptor PMT (tubo fotomultiplicador) (E) y los dos receptores elásticos con control digital (G,F).

Desde el 2001, se está trabajando en integrar un canal Raman en el citado sistema lidar 3D [45]. Este canal Raman, aprovecha la interacción con el nitrógeno atmosférico  $N_2$  (la especie más abundante y de proporción perfectamente conocida (78%)), para autocalibrar el sistema e invertir así, de forma totalmente independiente [46], los coeficientes de extinción y retrodispersión atmosféricos. La Figura 25 muestra un prototipo del cabezal óptico separador de las tres longitudes de onda en recepción, y que dará paso al sistema SRL (Scanning Raman Lidar), pionero en Europa por sus capacidades de medida integradas. La Figura 26 presenta un ejemplo de inversión de señales Raman en *link-detect* con recuperación de la *lidar ratio* (ya no una hipótesis correladora) en el marco de una intercomparación software [47] dentro de EARLINET.

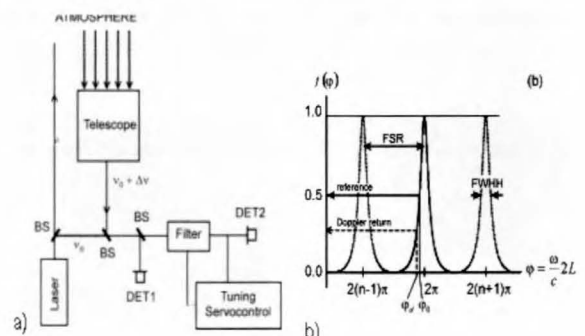
### 3.4 Actividades de lidar Doppler y baja potencia

El grupo de investigación ha desarrollado además un trabajo simultáneo en técnicas de teledetección óptica mediante láseres de baja potencia, que ha dado lugar a: 1) la realización de radares Doppler láser para la medida de velocidades en blancos sólidos [48] (Figura 27) y 2) aplicaciones específicas de medida de velocidades hidrodinámicas [49-50] (Figura 28). Parte de sus resultados se han utilizando en el proyecto de transferencia tecnológica PETRI 95-0249-OP con la empresa española Monocrom, S.L.

La primera actividad, se ha organizado entorno a maquetas de blancos sólidos y un interferómetro Fabry-Pérot –



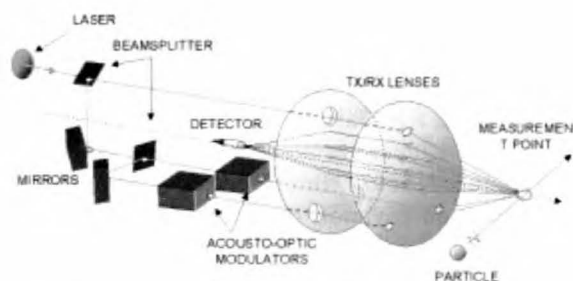
**Figura 26.** Inversión señales lidar Raman mediante *link-detect* en el marco de la intercomparación con el resto de equipos investigadores del proyecto europeo EARLINET (2000-2003). El procesado de señal utiliza herramientas apropiadas de cancelación de ruido y promediado espacial con resolución variable para adecuar la resolución de inversión a la SNR disponible para cada tramo de distancias. (a) Recuperación de la extinción Mie atmosférica (en rojo), errorbars asociados (amarillo) y comparación con el retorno Rayleigh (azul). (b) *Idem* que (a) para la variable atmosférica de retrodispersión Mie (backscatter). (c) Recuperación de la *lidar ratio*, que puede relacionarse con el tipo de aerosol atmosférico monitorizado. Obsérvese como el algoritmo estima perfectamente este parámetro (con baja varianza) en el primer tramo (500-1800 m), correspondiente a la capa de mezcla atmosférica (PBL), y en un segundo intervalo (3200-4000 m) correspondiente a una estratificación por inyección de aerosoles a esa altura.



**Figura 27.** (a) Layout óptico correspondiente a un prototipo de laboratorio de lidar Doppler basado en la técnica de detección por flanco (*edge-technique*). En recepción, el retorno Doppler ( $w_d$ ) se compara periódicamente con una muestra láser de la fuente emisora ( $w_0$ ) y, mediante un interferómetro Fabry-Perot, se mide el desplazamiento Doppler y su signo. (b) Principio de la detección por flanco. El interferómetro óptico (equivalente a un filtro paso banda de gran pureza espectral) actúa como transductor frecuencia-tensión que cuantifica el desplazamiento Doppler ( $w_d$ ).



como corazón del sistema- como primer paso para abordar un sistema láser Doppler atmosférico de medida de campos de vientos. El sistema utiliza la técnica de detección por flanco (o edge-technique), como técnica de detección directa del desplazamiento Doppler y un sistema específico de servocontrol y sincronización, para mantener la estabilidad y repetibilidad de la curva de respuesta del filtro interferencial.



**Figura 28.** Teledetección óptica semiconductor de baja potencia. Ejemplo de un prototipo de laboratorio de anemometría láser Doppler (LDA) para la medida de velocidades de fluidos mediante interferometría de franjas.

Como actividad complementaria orientada a establecer una línea estratégica de investigación y transferencia tecnológica medioambiental e industrial, el grupo se está introduciendo en el desarrollo de técnicas de detección de compuestos químicos mediante sistemas lidar de bajo coste que empleen como fuentes diodos láser y, eventualmente, con resolución en distancia utilizando esquemas de modulación apropiados, sintonizables [51].

## CONCLUSIONES

Este artículo describe brevemente las actividades realizadas en los últimos 10 años en el campo de la Teledetección por el grupo de Ingeniería Electromagnética y Fotónica del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universitat Politècnica de Catalunya [1]. Además de los otros profesores que trabajan en Teledetección, estas actividades no se hubieran podido llevar a cabo sin la colaboración de los técnicos de laboratorio y taller, y los demás profesores del Grupo EEF que trabajan en los campos afines como las Antenas, los Circuitos de Microondas, los Métodos Numéricos etc.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] UPC remote sensing: <http://www-tsc.upc.es/rs>  
 [2] SMOS Earth Explorer web page: [http://www.esa.int/export/esaLP/ESAMBA2VMOC-smos\\_0.html](http://www.esa.int/export/esaLP/ESAMBA2VMOC-smos_0.html) (Febrero 2003)  
 [3] Thompson, A. R., J. M. Moran, G. W. Swenson, «Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy», John Wiley and Sons, 1986.

[4] Bará, J., A. Camps, F. Torres, I. Corbella, «Angular Resolution of Two-dimensional, Hexagonally Sampled Interferometric Radiometers», Radio Science, Vol 33, No 5, pp. 1459-1473, Septiembre-Octubre 1998.  
 [5] Camps, A., I. Corbella, J. Bará, F. Torres, «Radiometric Sensitivity Computation in Aperture Synthesis Interferometric Radiometry», IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 35, No 2, pp. 680-685, Marzo 1998.  
 [6] Torres, F., A. Camps, J. Bará, I. Corbella, «Impact of Receiver Errors on the Radiometric Resolution of Large 2D Aperture Synthesis Radiometers. Study Applied to MIRAS», Radio Science, Vol. 32, No 2, pp. 629-642, Marzo-Abril, 1997.  
 [7] Camps, A., J. Bará, F. Torres, I. Corbella, J. Romeu, «Impact of Antenna Errors on the Radiometric Accuracy of Large Aperture Synthesis radiometers. Study Applied to MIRAS», Radio Science, Vol. 32, No 2, pp. 657-668, Marzo-Abril 1997  
 [8] Camps, A., F. Torres, I. Corbella, J. Bará, J. A. Lluch, «Threshold and Timing Errors of 1 bit/2 level Digital Correlators in Earth Observation Synthetic Aperture Radiometry», Electronics Letters, Vol. 33, No 9, pp. 821-823, 24 Abril 1997.  
 [9] Torres, F., A. Camps, J. Bará, I. Corbella, R. Ferrero, «On-Board Phase and Modulus Calibration of Large Apertura Sythesis Radiometers: Study Applied to MIRAS», IEEE Trans on Geosci. and Rem. Sensing, GRS-34, No 4, pp 1000-1009.  
 [10] Camps, A., J. Bará, F. Torres, I. Corbella, «Extension of the CLEAN Technique to the Microwave Imaging of Continuous Thermal Sources by Means of Aperture Synthesis Radiometers», Progress In Electromagnetics Research, Vol. PIER 18, pp. 67-83, Enero 1998.  
 [11] Camps, A., F. Torres, J. Bará, I. Corbella, M. Pino, M. Martín Neira, «Evaluation of MIRAS spaceborne instrument performance: snap shot radiometric accuracy and its improvement by means of pixel averaging», European Symp. on Aerosp. Rem. Sens., Conf. on Sensors, Systems and Next Generation Satellites III, Proc. of the Europto 1997, London, UK, Sept. 22-26, 1997, Vol 3221, pp 43-52, Septiembre 1997.  
 [12] Camps, A., M. Zapata, I. Corbella, «SMOS Performance Simulation Analysis», International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2002, Toronto, Canada, Junio 2002.  
 [13] Camps, A., F. Torres, I. Corbella, J. Bará, X. Soler, «Calibration and experimental results of a two-dimensional interferometric radiometer laboratory prototype», Radio Science, Vol. 32, No 5, pp 1821-1832, Septiembre-Octubre 1997.

- [14] Sumpsi, A., «Design and test of a Delay-Doppler Radiometer», Proyecto Final de Carrera, ETSETB, 2003 (en prensa).
- [15] J. Bará, I. Corbella, F. Torres, A. Camps, M. Martín-Neira, G. Nesti, E. Olhmer, «Remote Sensing of Hydrometeors by means of interferometric radiometry: theory and experimental results», *Radio Science*, Vol 35, No 3, pp. 799-812, Mayo-Junio 2000.
- [16] Martínez-Vázquez, A., A. Camps, N. Duffo, M. Vall-Ilossera, J.M. López-Sánchez, «Full-Polarimetric Emissivity of Vegetation-Covered Soils: Vegetation Structure Effects», *International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2002*, Toronto, Canada, Junio 2002.
- [17] Camps, A., M. Vall-Ilossera, N. Duffo, F. Torres, J. Bará, I. Corbella, J. Capdevila, «Polarimetric Radiometry of Rain Events: Theoretical Prediction and Experimental Results», 6th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Florence, Italy, March 15-18, 1999.
- [18] A. Camps, J. Font, J. Etcheto, V. Caselles, A. Weill, I. Corbella, M. Vall-Ilossera, N. Duffo, F. Torres, R. Villarino, L. Enrique, A. Julià, C. Gabarró, J. Boutin, E. Rubio, S.C. Reising, P. Wursteisen, M. Berger, y M. Martín-Neira, «Sea Surface Emissivity Observations at L-band: First Results of the Wind and Salinity Experiment WISE-2000», *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 40, No 10, pp 2117-2130, October 2002.
- [19] A. Camps, I. Corbella, M. Vall-Ilossera, N. Duffo, F. Torres, R. Villarino, L. Enrique, F. Julbé, J. Font, A. Julià, C. Gabarró, J. Etcheto, J. Boutin, A. Weill, V. Caselles, E. Rubio, P. Wursteisen, M. Martín-Neira, «L-Band Sea Surface Emissivity: Preliminary Results Of The WISE-2000 Campaign And Its Application To Salinity Retrieval In The SMOS Mission», *Radio Science* (in press).
- [20] Nogués, O., «Disseny, muntatge i validació d'un receptor/gravador de senyals GPS per a la demostració del concepte PARIS», Proyecto Final de Carrera, ETSETB, 2002.
- [21] M. Bara, «Airborne SAR Interferometric Techniques for mapping applications», Tesis Doctoral, Septiembre 2000.
- [22] J. Mallorquí, M. Bara, A. Broquetas, M. Wis, A. Martínez, L. Nogueira, V. Moreno, «Parallel Algorithms for High-Speed SAR Processing», *EUROPTO'98*, September 1998.
- [23] Bara, M.; Prats, P.; Mallorquí, J.J.; Lopez, J.; «Validation of SAR interferometric phase corrections in the squinted case for DEM quality enhancement» *Electronics Letters*, Volume: 38 Issue: 22, Oct 2002 Page(s): 1380 -1381
- [24] D. Carrasco, «SAR Interferometry for Digital Elevation Model Generation and Differential Applications», PhD Dissertation, March 1998.
- [25] D. Carrasco, D. Esteban, F. López, J. Tena, O. Rodríguez, M. Bara, A. Broquetas, «Precise Geometry Techniques for ERS SAR Interferometry», *European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR'98*, May 1998.
- [26] Mora, O.; Mallorquí, J.J.; Duro, J., «Generation of deformation maps at low resolution using differential interferometric SAR data», *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International, Volume: 5, 2002, Page(s): 2696 -2698.
- [27] Mora, O.; Lanari, R.; Mallorquí, J.J.; Berardino, P.; Sansosti, E., «A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms», *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International, Volume: 2, 2002, Page(s): 1237 -1239.
- [28] O. Mora, J.J. Mallorquí, A. Broquetas, «Linear and Non-Linear Terrain Deformation Maps from a Reduced Set of Interferometric Images», en proceso de revisión en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- [29] IMPAST web page <http://intelligence.jrc.cec.eu.int/fish/index.htm>
- [30] Mallorquí, J.J.; Rius, J.M.; Bara, M., «Simulation of polarimetric SAR vessel signatures for satellite fisheries monitoring», *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International, Volume: 5, 2002, Page(s): 2711 -2713
- [31] L. Sagués, M. Bara, A. Broquetas, X. Fàbregas, «An Interferometric Circular Synthetic Aperture Radar (InCSAR) System for Ground-Based Applications», *NATO RTO-SET Symposium on High Resolution Radar Techniques*, March 1999.
- [32] L. Sagués, J. M. López, J. Fortuny, X. Fàbregas, A. Broquetas, Sieber, «Wide-Band Polarimetric SAR Interferometry for Buried Mine Detection», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 6, pp.1271-1278, June 2001.
- [33] Rocadenbosch, F. (1996). «Lidar Sensing of the Atmosphere: Receiver Design and Inversion Algorithms for an Elastic System.» Tesis doctoral. Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politècnica de Catalunya, UPC.
- [34] Rocadenbosch, F., Comerón, A., Pineda, D. (1998), «Assessment of lidar inversion errors for homogeneous atmospheres», *Appl. Opt.* 37 (12), 2199-2206.
- [35] Rocadenbosch, F., Comerón, A., (1999), «Error Analysis For The Lidar Backward Inversion Algorithm», *Appl. Opt.* 38(21), 4461-4474.
- [36] Rocadenbosch, F., Comerón, A., Albiol, L., (2000), «Statistics Of The Slope-Method Estimator», *Appl. Opt.* 39(33), 6049-6057.
- [37] Rocadenbosch, F., Vázquez, G., Comerón, A. (1998), «Adaptive Filter Solution For Processing Lidar Returns: Optical Parameter Estimation», *Appl. Opt.* 37 (30), 7019-7034.
- [38] Matthias, V.; Böckmann, C.; Freudenthaler, V.; Pappalardo, G.; Bösenberg, J.; Amiridis, V.; Amodeo, A.; Ansmann, A.; Balis, D.; Boselli, A.; Chaykovski, A.; Chourdakis, G.; Comerón,

- A.; Delaval, A.; De Tomasi, F.; Eixmann, R.; Frioud, M.; H<sup>-</sup>g<sup>-</sup>rd, A.; Iarlori, M.; Komguem, L.; Kreipl, S.; Larchevêque, G.; Linné, H.; Matthey, R.; Mattis, I.; Papayannis, A.; Pelon, J.; Perrone, R. M.; Persson, R.; Resendes, D. P.; Rizi, V.; Rocadenbosch, F.; Rodríguez, J. A.; Sauvage, L.; Schneider, J.; Schumacher, R.; Shcherbakov, V.; Simeonov, V.; Wandinger, U.; Wang, X.; Wiegner, M.; Zerefos, C. (2002), «Lidar Intercomparisons on algorithm and system level in the frame of EARLINET,» Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany, ISSN 0937-1060, 67 pp.
- [39] Rocadenbosch, F.; Soriano, C.; Comerón, A.; Baldasano, J. M.; Rodríguez, A.; Muñoz, C.; García-Vizcaíno, D. (2001), «3D Scanning Portable Backscatter Lidar Platform for Atmospheric Remote Sensing: Performance and Architecture Overview.» *Proc. EUROPTO 2000*, Barcelona, Sept. 26-28, 2000; Russell, J.E., Schäfer, K., Lado-Bordowsky, O., Eds.; SPIE, Bellingham, Washington, 2001; 158-169. Proc. 4168.
- [40] Bösenberg, J.; Ansmann, A.; Baldasano, J. M.; Balis, D.; Böckmann, C.; Calpini, B.; Chaikovsky, A.; Flamant, P.; Hägard., A.; Mitev, V.; Papayannis, A.; Pelon, J.; Resendes, D.; Schneider, J.; Spinelli, N.; Trickl, T.; Vaughan, G.; Visconti, G.; Wiegner, M. (2000), «EARLINET: A European aerosol research lidar network.» *Proc. 20th International Laser Radar Conference (ILRC)*, Vichy (France), July 10-14, 2000; Pelon, J., Dabas, A., Loth, C., Eds.; IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), 2000; Session 2 (Aerosol Properties and Radiation Budget (ARB)), paper 4.
- [41] Soriano, C., Rocadenbosch, F., Rodríguez, A., Muñoz, C., García-Vizcaíno, D., Baldasano, J.M., Comerón, A., (2001), «Barcelona Atmospheric Monitoring with Lidar: first measurements with the UPC's scanning portable lidar» *Proc. EUROPTO 2001*, Barcelona, Sept. 26-28, 2000; Russell, J. E., Schäfer, K., Lado-Bordowsky, O., Eds.; SPIE, Bellingham, Washington, 2001; 158-169. Proc. 4168.
- [42] Papayannis, A., Boselli, A., Calpini, B., Chaikovsky, A., Chourdakis, G., Cuomo, V., Frioux, M., Iarlori, M., Kreipl, S., Larcheveque, G., Matthey, R., Pappalardo, G., Pelon, J., Perrone, M., Rizi, V., Rocadenbosch, F., Sauvage, V., Sobolewski, P., Soriano, C., Spinelli, N., Tomasi, F.D., Amoiridis, V., Balis, D., Trickl, T., (2001), «Simultaneous observations of free tropospheric Saharan dust layers over Europe monitored by a co-ordinated ground-based lidar network in frame of the EARLINET project», *Journal of Aerosol Science* 32, 389-390.
- [43] Sicard, M., Rocadenbosch, F., López, M.A., Comerón, A., Rodríguez, A., Muñoz, C., García-Vizcaíno, D. (2003), «Characterization of aerosol backscatter-to-extinction ratio from multi-wavelength and multi-angular lidar profiles.» *Proc. SPIE, European Symposium on Remote Sensing. Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VII (EUROPTO 2002)*, In press.
- [44] Klett, J.D. (1986), «Extinction boundary value algorithm for lidar inversion», *Appl. Opt.* 25(15), 2462-2464.
- [45] Rocadenbosch, F., Sicard, M., Comerón, A., Baldasano, J.M., Rodríguez, A., Agishev, R., Muñoz, C., López, M.A., García-Vizcaíno, D. (2002), «The UPC Scanning Raman Lidar: An engineering overview.» *Proc. ILRC21*, International Laser Radar Conference, Québec (Canada), Jul. 8-12, 2002; Luc R. Bissonnette, Gilles Roy, and Gilles Vallée, Eds.; Library Services, Defence R&D Canada -Valcartier; Session on New Lidar Technologies and Methods, pp. 353-356.
- [46] Ansmann, A.; Wandinger, U.; Riebesell, M.; Weitkamp, C.; Michaelis, W. (1992), «Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar,» *Appl. Opt.* 31(33), 7113-7131.
- [47] Böckmann, C., Wandinger, U., Ansmann, A., Bösenberg, J., Amiridis, V., Boselli, A., Delaval, A., Tomasi, F.D., Frioud, M., Iarlori, M., Komguem, L., Kreipl, S., Larcheveque, G., Matthias, V., Papayannis, A., Rocadenbosch, F., Schneider, J., Shcherbakov, V., Wiegner, M., (2001), «EARLINET-Lidar Algorithm Intercomparison,» *J. Aerosol Science* 32, 433-434.
- [48] Rodríguez, A., Comerón, A., González, E., Elías, A., (1995), «Traffic monitoring: The coherent laser radar approach», *Microwave Eng. Europe*, pp. 29-34.
- [49] Rodríguez, A., Comerón, A., García, D., (2001), «Homodyne laser radar system for surface displacement monitoring», *Opt. Eng.* 40(3), 398-405.
- [50] Rodríguez, A., García, D., Comerón, A., Dios, F., Rocadenbosch, F., (2001), «Self-aligned heterodyne laser radar system for surface displacement monitoring.» *Proc. EUROPTO 2001*, Barcelona, Sept. 25, 2000; Gonglewski, J. D., Kamerman, G., Kohnle, A., Schreiber, U., Werner, C., Eds.; SPIE, 2001, 221-229. Proc. 4167.
- [51] Marx, B.R. (1994), «New devices close in on environmental pollution,» *Laser Focus World*, 30(8), S11-S14.[33] Papayannis, A., Boselli, A., Calpini, B., Chaikovsky, A., Chourdakis, G., Cuomo, V., Frioux, M., Iarlori, M., Kreipl, S., Larcheveque, G., Matthey, R., Pappalardo, G., Pelon, J., Perrone, M., Rizi, V., Rocadenbosch, F., Sauvage, V., Sobolewski, P., Soriano, C., Spinelli, N., Tomasi, F.D., Amoiridis, V., Balis, D., Trickl, T., (2001), «Simultaneous observations of free tropospheric Saharan dust layers over Europe monitored by a co-ordinated ground-based lidar network in frame of the EARLINET project,» *Journal of Aerosol Science* 32, 389-390.



## AUTORES



**Adriano Camps** nació en Barcelona en 1969. Es Ingeniero en Telecomunicaciones (1992) y Doctor Ingeniero en Telecomunicaciones (1996) por la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. En 1991-1992 estuvo en la ENS des Télécommunications de Bretagne, France con una beca Erasmus, realizando el Proyecto Final de Carrera en la empresa

Eurowaves-Sorep (hoy perteneciente a Thales), Rennes. En 1992-1993 trabajó para el Badalona Centre Internacional de Negocis planificando la infraestructura de comunicaciones. En 1993 inició su carrera académica en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) como Profesor Asociado (1993-1997) y como Profesor Titular (1997-actualidad). Durante 1999 estuvo en el Microwave Remote Sensing Laboratory, de la Universidad de Massachusetts. Su investigación se ha centrado principalmente en la teledetección pasiva en microondas, y más concretamente el proyecto SMOS/MIRAS. Es miembro Senior del IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRS), Presidente del Capítulo Español del IEEE GRS-S, desde Enero 2003 Editor del IEEE GRS-S Newsletter y desde Enero de 2000 Editor Asociado de la Revista Radio Science. En 1993, recibió el Segundo premio Nacional de Terminación de Estudios Universitarios, en 1997 el Premio INDRA del COIT a la mejor Tesis doctoral en Teledetección, en 1999 el Premio Extraordinario de Doctorado de la UPC, y junto con el resto de los miembros del grupo de radiometría de microondas, en 2000 el Primer Premio Duran Farell de Investigación Tecnológica, y en 2001 el Primer Premio Ciutat de Barcelona d'Investigació Tecnològica, y en 2002 la «Distinció de Recerca de la Generalitat de Catalunya».



**Mercè Vall-llossera** nació en Lleida en 1966. Recibió los títulos de ingeniera en telecomunicaciones y Doctora en ingeniería de telecomunicaciones por la Universidad Politècnica de Catalunya, en los años 1990 y 1994, respectivamente. Es profesora la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Barcelona desde noviembre

de 1990 primero como profesora asociada, en 1996 obtuvo la plaza de Profesora Titular de Escuela Universitaria y en 1997 la de Profesora Titular de Universidad. En 1996 obtuvo la beca postdoctoral Programme Québécoise de Bourses d'Excellence: Stages de Formation Postdoctorale au Québec pour jeunes diplômés étranger, por la que estuvo trabajando en la Universidad de Concordia (Montreal, Canadá), durante 9 meses. Su investigación estuvo dedicada inicialmente en los métodos numéricos aplicados al análisis de la sección recta radar y el diseño de antenas. En la actualidad está centrada en la radiometría por microondas. Junto con

todos los demás miembros del grupo de radiometría de microondas, en el año 2000 recibió el primer Premio Duran Farell de Investigación Tecnológica, y en 2001 el Primer Premio Ciutat de Barcelona d'Investigació Tecnològica.



**Jordi J. Mallorquí** nació en Tarragona en 1966. Ingeniero de Telecomunicación (1990) y Doctor Ingeniero (1995) por la Universitat Politècnica de Catalunya inició en 1993 su carrera académica en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la UPC como Profesor Asociado (1993-1997) y posteriormente como Profesor Titular (1997-actualidad) asignado a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona.

Inicialmente su investigación se centro en técnicas de formación de imágenes para aplicaciones biomédicas mediante tomografía de microondas. En 1997 recibió el Premio Extraordinario de Doctorado en Ingeniería de Telecomunicación de la UPC. Durante 1999 realizó una estancia de 11 meses en el Jet Propulsion Laboratory (JPL-NASA) trabajando en calibración de sistemas SAR aerotransportados. Actualmente su investigación se centra en el desarrollo de algoritmos de procesamiento SAR, interferometría diferencial para el control de subsidencias y simulación de sistemas SAR. Miembro del IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRS) es autor de numerosas publicaciones internacionales y revisor del IEEE y del IEE.



**Francesc Rocadenbosch** nació en Barcelona en 1967. Ingeniero Superior en Telecomunicación (1991) y Doctor Ingeniero (1996) por la Universidad Politècnica de Catalunya inició su carrera profesional en 1991, en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, donde colaboró en el diseño de sistemas de alta frecuencia y microondas, y posteriormente, en 1993, la continuó como profesor del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (UPC), de la que actualmente es profesor Titular de Universidad desde 1997. Premio al mejor Proyecto de Investigación en Cataluña (ACET, 1999) y máster en Administración y Dirección de Empresas (MBA) por la Universidad de Barcelona (2001), desde 1993 ha desarrollado una intensa actividad investigadora en el campo de los radares láser y la optoelectrónica a nivel internacional, donde ha participado en más de una decena de proyectos. Miembro de la Optical Society of America, es autor de numerosas publicaciones internacionales y revisor de diversas revistas de ingeniería óptica y procesamiento de la señal. Sus intereses actuales comprenden el diseño de sistemas de radar láser (lidar) de baja energía, receptores de altas prestaciones y técnicas de procesamiento en teledetección láser.